干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

毛乌素沙地样品扫描电镜的矿物定量分析

崔颖颖， 周亚利， 陈国祥， 黄春长， 庞奖励， 羊俊敏， 闫雪娇
（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710062）

摘 要：矿物定量分析实验用捷克FEI公司生产的MLA650F型矿物解离分析仪，采用MLA原样法和MLA重矿法分别对毛乌素沙地西南和东南地区典型沙样的矿物组成以及含量进行分析，结果表明：MLA650F仪器测量结果的重复性好，精确度高，测得的矿物种类比光学显微镜更丰富，但不能如同光学显微镜一样直接提供矿物最原始的颜色、形状、透明度、光泽、表面断口等特征。虽然扫描电镜与光学显微镜测得的单个矿物含量和矿物分析指标存在一定差异，但矿物含量变化趋势基本一致，均得到毛乌素沙地主要轻矿物以石英-长石为主，重矿物以角闪石-石榴子石为主的结论。此外，扫描电镜与光学显微镜对同一样品的矿物分析指标变化趋势基本一致，其中MLA原样法与光学显微镜的*Q*/*TF*和*ATi*指标同化学风化指标*CIA*结果一致，均表明毛乌素沙地西南地区风化作用较东南地区强。虽然扫描电镜与光学显微镜均能反应沉积物的沉积环境，但在实际工作中，要注意所使用的数据应建立在同一测量系统内，不同实验室或实验方法测得的实验数据在引用时要慎重。

关 键 词：扫描电镜；矿物分析；毛乌素沙地
文章编号：

物源分析在确定沉积物物源空间位置和源岩性质，以及沉积物搬运路径、沉积作用和构造演化等方面具有重要意义[1]。随着现代分析手段的提高，物源分析方法日趋增多[1]。其中，矿物分析法由于实验载体容易获得，能较多地保留其母岩信息的特征，在物源分析中占重要地位[2]。光学显微镜法和扫描电镜QEMSCAN（Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy）分析法是目前矿物分析运用较广泛的两种方法。光学显微镜法是根据矿物晶体形态和光学性质等对矿物的特征进行归类统计[3-4]。该方法需要有丰富矿物学知识的专业人员在光学显微镜下用肉眼鉴定，且小于20 μm的颗粒很难识别，鉴定难度大[5]。QEMSCAN分析法，是将扫描电子显微镜和X射线能量色散谱分析仪相结合，对每个单颗粒矿物通过特定元素含量及其特性的测定，来识别矿物种类并进行百分含量的统计，不受颗粒大小限制，可识别纳米级颗粒。

捷克FEI公司生产的MLA650F型矿物解离分析仪拥有1 000多种标准矿物谱图，平均每小时可以识别20 000个颗粒，极大的提高了矿物识别的效率和精确度。本文使用MLA650F型矿物解离分析仪，采用MLA原样法（MLA-YY）和MLA重矿法（MLA-ZK），分别对毛乌素沙地西南地区1号、2号沙样和东南地区3号、4号沙样的矿物组成以及含量进行分析，检验扫描电镜矿物解离分析效果。

1 研究区概况

毛乌素沙地是我国四大沙地之一，介于37°27.5′～39°22.5′N和107°20′～111°30′E之间，大部分位于鄂尔多斯东南洼地，沙地内部分布多种风沙地貌类型，包括固定、半固定沙丘和流动沙丘[6-7]。

收稿日期：2019-12-24； **修订日期**：2020-04-01
基金项目：国家自然科学基金项目（4207112，41371209，41771110，41971116）；中国博士后特别资助项目（2012T50795）；中国博士后基金项目（2011M501443）
作者简介：崔颖颖（1994-），女，河南焦作人，硕士研究生，从事沉积物物源分析研究. E-mail: yingyingcui94@163.com
通讯作者：周亚利（1971-），女，陕西西安人，副教授，从事气候变化与环境演变. E-mail: ylzhou109@163.cm

毛乌素沙地属于温带干旱-半干旱的大陆性季风气候，具有典型的过渡性[8]，年平均气温介于6～9 ℃，年平均降水量在200～490 mm之间，年蒸发量在1 800～2 500 mm，年平均风速约4 m·s^{-1}最高风速可达28 m·s^{-1}[9]。采样方法与LANCASTER[10]在纳米布沙漠的采样标准相似：选取面积大约为20 cm×20 cm的沙面，均匀采集在表面0～10 cm深度的沙样。本文选取西南部1、2号样品，东南部3、4号样品4个地表沙样作为研究对象(图1)。

2 研究方法

QEMSCAN分析法是用捷克FEI公司生产的MLA650F型矿物解离分析仪完成矿物分析，该仪器是将扫描电子显微镜和X射线能量色散谱分析仪相结合，通过元素含量确定矿物种类。具体的实验流程如下：

(1) MLA原样法，取100 g沙样均分，水洗去除草梱等杂质，称取2 g样品待做分析；MLA重矿法，取100 g原样用淘盘初筛，然后用三溴甲烷提取重矿物，MLA重矿物法只测试提取出的重矿物。

(2) 树脂包埋，把树脂和硬化剂按照15:2的比例配好，用丹麦Struers生产的CitoVac真空冷镶嵌机将样品包埋在30 mm直径的磨具内。

(3) 研磨抛光，用丹麦Struers生产的Tegramin-20自动研磨机上经过4道工序抛光。

(4) 喷碳镀膜，用美国Anatech生产的HummerCDS2.2喷碳仪对所有测试样品喷碳。

(5) 矿物鉴定，用捷克FEI公司生产的MLA650F型矿物解离分析仪完成矿物分析。

3 结果

3.1 测试结果的精确性

MLA原样法的测试结果见表1。两种前处理方法重复实验测得的矿物种类完全相同，均含有石英、各种长石、云母、铁橄榄石等矿物共46种。

根据毛乌素沙地的沙样在MLA650F矿物解离分析仪上的重复测试结果显示，MLA原样法的标准差(SD)都介于0～0.87%之间，其变化幅度均低于1%；MLA重矿法的标准差都介于0～2.39%之间，其变化幅度均不超过3%，由此可知，MLA仪器的测试精确性高。其中，MLA原样法的标准差比MLA重矿法的标准差小，主要原因可能是没有人为地剔除沉积物中的矿物，而MLA重矿法在筛选重矿物的过程中为了防止重矿物丢失，轻矿物会不同程度的遗留。所以MLA重矿法前处理过程可能因操作人员的经验丰富度影响结果的精确性，同一批样品最好由同一个实验员完成。

3.2 轻矿物含量对比

轻矿物是指比重小于2.86 g·cm^{-3}的造岩矿物[11]。因为MLA重矿法前处理时已去除大部分轻

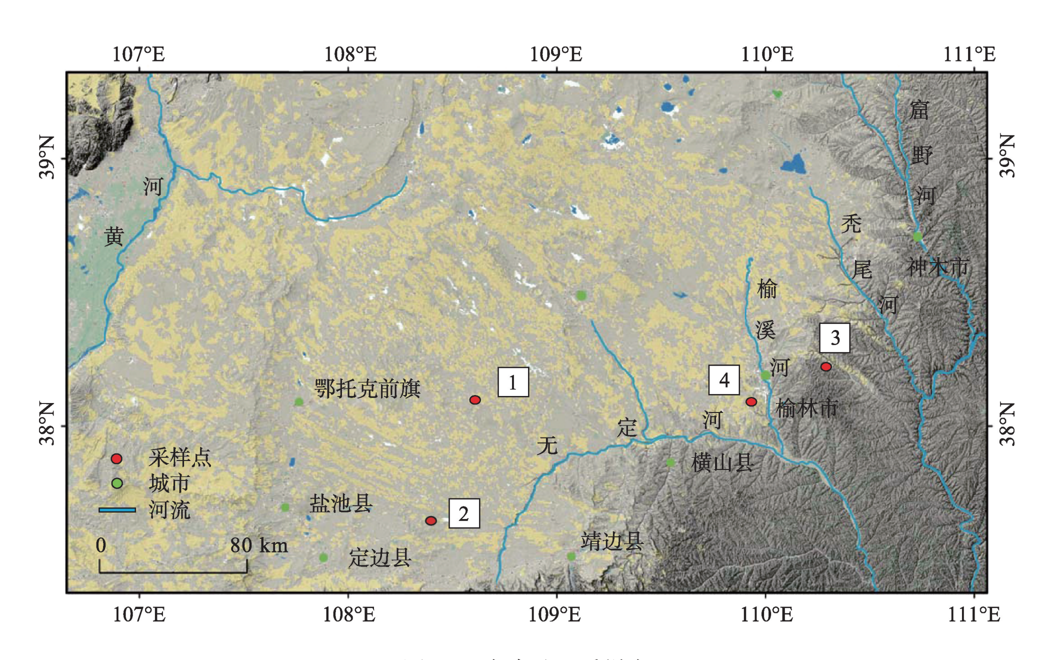


图1 毛乌素沙地采样点

Fig. 1 Sample location of the Mu Us Sandy Land

表1　毛乌素沙地沙样在MLA650F矿物解离分析仪的重复测试结果

Tab. 1　Repeated measurement results of the Mu Us Sandy Land sand on MLA650F mineral liberation analyzer　/%

矿物名称	MLA-YY			MLA-ZK				
	1YY-A	1YY-B	1YY-SD	4ZK-A1	4ZK-A2	4ZK-B1	4ZK-B2	4ZK-SD
石英	59.57	60.67	0.78	33.75	31.87	37.20	36.13	2.39
钠长石	13.55	13.74	0.13	18.35	19.02	19.07	18.44	0.38
钾长石	4.54	3.87	0.47	6.37	4.72	6.02	5.87	0.72
斜长石	3.43	3.09	0.24	17.30	16.91	18.47	19.11	1.02
正长石	4.19	3.62	0.40	1.30	1.21	1.20	1.54	0.16
白榴石	3.58	4.81	0.87	5.52	5.89	5.96	5.75	0.20
滑石	0.06	0.09	0.02	0.01	–	–	0.01	–
高岭石	0.07	0.10	0.02	–	0.01	–	–	–
方解石	0.87	0.60	0.19	–	0.01	–	–	–
白云石	0.09	–	0.07	–	0.01	–	–	–
铁白云石	0.02	0.01	0.01	/	/	/	/	/
菱铁矿	/	/	/	0.01	–	–	–	
黝帘石	0.27	0.30	0.03	0.06	0.06	0.03	0.05	0.01
角闪石	0.46	0.94	0.34	0.26	0.30	0.22	0.20	0.04
透闪石	0.01	0.03	0.02	/	/	/	/	/
阳起石	0.98	0.49	0.35	2.12	3.05	1.57	1.83	0.65
白云母	3.32	3.17	0.11	2.74	2.55	2.29	2.53	0.19
铁橄榄石	0.03	0.05	0.01	0.01	–	–	–	–
黑云母	0.06	0.08	0.01	0.03	0.04	0.03	0.05	0.01
顽辉石	0.01	–	–	/	/	/	/	/
绿帘石	0.66	0.63	0.02	0.19	0.24	0.07	0.16	0.07
透辉石	0.10	0.09	0.01	0.01	0.03	0.08	0.05	0.03
铁辉石	0.08	0.07	0.01	0.10	0.10	0.05	0.08	0.03
褐帘石	0.04	0.12	0.06	0.05	0.10	0.01	0.04	0.04
磷褐帘石	–	0.08	0.05	0.01	0.03	–	–	0.01
磷灰石	0.04	0.02	0.02	0.16	0.25	0.10	0.17	0.06
斜绿泥石	0.03	0.04	0.01	0.01	–	0.01	0.01	–
绿泥石	1.69	1.49	0.14	0.62	0.74	0.40	0.70	0.15
钙铁榴石	0.17	0.05	0.09	0.07	0.02	0.04	0.03	0.02
锰铝榴石	0.01	–	0.01	0.09	0.16	0.07	0.05	0.05
铁铝榴石	0.66	0.50	0.11	6.34	7.00	4.61	4.29	1.32
钛铁矿	0.11	0.06	0.04	2.13	2.67	0.87	1.28	0.82
锰钛铁矿	0.04	0.01	0.02	0.19	0.35	0.09	0.13	0.11
赤铁矿	0.14	0.10	0.03	0.17	0.22	0.06	0.11	0.07
磁铁矿	0.22	0.06	0.11	0.23	0.18	0.21	0.14	0.04
钛磁铁矿	0.04	0.01	0.03	0.25	0.27	0.11	0.11	0.09
针铁矿	0.22	0.22	0.22	0.12	0.21	0.05	0.07	0.07
榍石	0.10	0.07	0.02	0.48	0.60	0.29	0.35	0.14
锆石	0.04	0.02	0.02	0.12	0.30	0.14	0.10	0.09
金红石	0.09	0.04	0.03	0.18	0.33	0.20	0.11	0.09
翡翠	0.02	0.13	0.08	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02
电气石	0.29	0.51	0.16	0.38	0.24	0.21	0.26	0.07
红柱石	0.02	–	0.01	/	/	/	/	/
十字石	/	/	/	0.03	0.09	0.11	0.15	0.05
独居石	/	/	/	0.01	0.01	–	–	–
尖晶石	0.01	–	–	0.01	0.03	–	–	0.01
其他	0.07	0.02	0.04	0.21	0.13	0.14	0.09	0.05

注：“–”代表含量小于0.01%；“/”代表未发现矿物；MLA-YY，MLA原样法；MLA-ZK，MLA重矿法；1YY-A、1YY-B分别代表1号样品原样称A、B两份各100 g，通过缩分法分别缩分至2 g记作1YY-A、1YY-B的两个平行子样；4ZK-A1，4ZK-A2，4ZK-B1，4ZK-B2分别代表4号样品原样称A、B两份各100 g挑选重矿物，再将挑选出来的重矿物一分为二分别记作4ZK-A1，4ZK-A2，4ZK-B1，4ZK-B2共4个平行子样；1YY-SD代表1号样品原样重复测试后的标准差；4ZK-SD代表4号样品挑选重矿物上机后的重复测试的标准差

矿物，轻矿物含量与实际含量不符，所以轻矿物含量对比选择1号、2号、3号和4号共4个样品的光学显微镜法（LF）和MLA原样法（MLA-YY），测试结果见表2。根据测试结果统计，光学显微镜法发现了石英、长石、绿泥石、碳酸盐共4种矿物，MLA原样法除了以上4种之外还发现有少量的云母、滑石、高岭石共7种矿物。从测试结果来看，这两种方法测得的轻矿物含量以石英和长石为主，其他矿物含量均在3.5%以下。对比光学显微镜法，MLA矿物解离分析仪对含量极少的矿物也能测得，因此MLA法测得的矿物种类更丰富。

图2是根据光学显微镜法和MLA原样法测得的轻矿物含量绘制的折线图，从图中可明显看出1号样品（图2a），2号样品（图2b）2种方法的矿物含量的变化趋势基本相同，3号（图2c）、4号（图2d）样品中石英和长石含量变化趋势不一致，通过计算可知MLA原样法测得的石英平均含量占50.63%，较光学显微镜法低16%左右；长石含量占44.72%较光学显

表2　毛乌素沙地沙样在光学显微镜与MLA650F矿物解离分析仪的轻矿物含量对比

Tab. 2　Comparison of light mineral in the Mu Us Sandy Land sand by MLA650F mineral liberation analyzer and optical microscope

/%

样品	实验方法	石英	长石	绿泥石	云母	滑石	高岭石	碳酸盐	蚀变矿物	其他
1	LF	63.49	18.56	/	/	/	/	0.22	17.73	/
	MLA-YY	63.11	30.66	1.70	3.48	0.08	0.09	0.84	/	0.05
2	LF	73.39	19.13	0.01	/	/	/	/	7.47	/
	MLA-YY	55.12	39.79	1.12	2.82	0.03	0.04	1.05	/	0.02
3	LF	64.32	28.00	0.01	/	/	/	/	7.67	/
	MLA-YY	44.26	52.21	0.74	2.70	0.01	0.03	0.01	/	0.05
4	LF	63.71	28.03	0.01	/	/	/	/	8.25	/
	MLA-YY	40.04	56.20	0.78	2.86	0.01	/	/	/	0.10

注：“/”代表未发现矿物；其他代表MLA650F仪器无法识别的矿物比重；LF，光学显微镜法

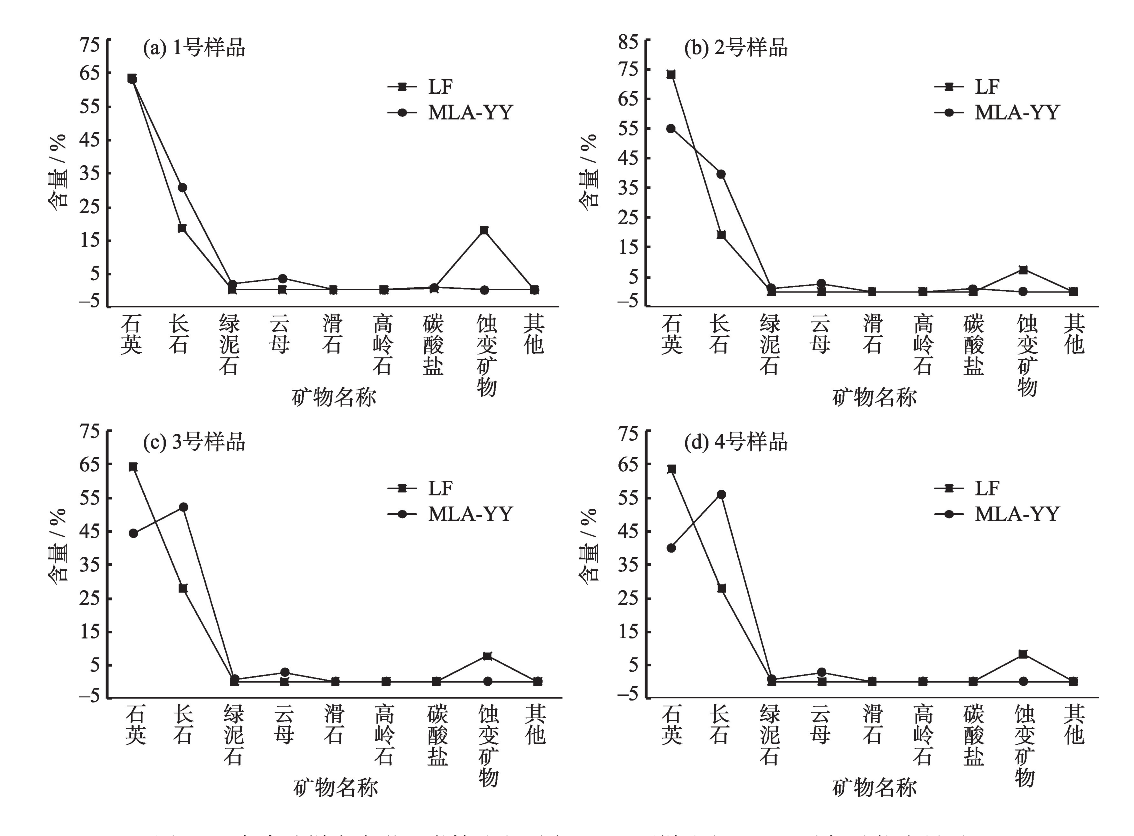


图2　毛乌素沙样在光学显微镜法（LF）与MLA原样法（MLA-YY）轻矿物含量对比

Fig. 2　Comparison of light mineral in the Mu Us Sandy Land sand by MLA-YY and optical microscope

微镜法高21%左右。这是因为MLA原样法在研磨抛光时已去除矿物表面的蚀变部分，可以完全消除蚀变矿物含量。在自然界中长石属于不稳定的轻矿物，较石英更容易蚀变[12]，蚀变矿物的存在会导致光学显微镜法中长石含量的测试结果被低估，石英的含量被高估。因此，光学显微镜法和MLA原样法轻矿物含量存在一定差异但变化趋势整体保持一致。

3.3 重矿物含量对比

重矿物指存在于陆源碎屑岩中相对密度大于2.86 g·cm^{-3}的矿物，具有耐磨蚀、稳定性强的特征，能较多地保留其母岩的信息[13]，不同的物源区会有相对不同的重矿物组合特征。选择所有样品进行测试，根据光学显微镜和MLA650F矿物解离分析仪测得的重矿物结果（表3）统计：光学显微镜法测得的重矿物种类有16种，MLA原样法和MLA重矿法共测得24种重矿物，除去与光学显微镜法重复的15种重矿物外还测得少量的透闪石、橄榄石、黝帘石、褐帘石、透辉石、针铁矿、红柱石、硬玉、尖晶石9种重矿物。据此可以看出MLA650F相比光学显微镜可以测出的重矿物的种类更加丰富。

从表3中可以看出，3种实验方法对同一样品的

表3 毛乌素沙样光学显微镜与MLA650F矿物解离分析仪重矿物含量对比

Tab. 3 Comparison of heavy mineral in the Mu Us Sandy Land sand by MLA650F mineral liberation analyzer and optical microscope

/%

		1号样品			2号样品			3号样品			4号样品		
		LF	MLA–YY	MLA–ZK	LF	MLA–YY	MLA–ZK	LF	MLA–YY	MLA–ZK	LF	MLA–YY	MLA–ZK
不稳定	角闪石	43.6	30.3	13.8	36.4	29.7	16.5	33.2	32.8	16.9	34.6	20.9	19.3
	辉石	0.1	1.7	1	0.1	2.4	0.9	/	0.5	0.3	/	0.8	0.6
	黄铁矿	/	–	–	△	/	–	*	/	/	/	/	–
	橄榄石	/	0.8	0.9	/	0.3	0.2	/	0.1	0.1	/	/	/
	透闪石	/	0.4	0.2	/	0.1	/	/	/	/	/	/	/
	绿帘石	4	13.6	12.1	4.4	9.1	5.5	2	2.8	1.2	1.1	1.6	1.3
	石榴石	18.5	14.8	18.5	33.1	22.8	31.5	29.9	29.4	31.4	37.2	44.8	45.8
较稳定	磷灰石	0.1	0.7	0.2	/	1.6	1.1	0.5	2.4	1.7	0.6	1.7	1.4
	十字石	0.3	/	0.1	/	/	0.3	/	/	0.2	/	1.5	0.8
	黝帘石	/	6	2.2	/	4	0.9	/	1	0.1	/	0.6	0.4
	褐帘石	/	2.6	0.6	/	0.6	0.3	/	0.4	0.3	/	0.5	0.5
	透辉石	/	1.9	2.3	/	1.9	1	/	1.6	0.3	/	0.6	0.4
	赤铁矿	9.1	2.6	13.4	8	3.7	7	6.2	1	1.1	2.7	1.1	1.1
	钛铁矿	5.3	2.4	9.2	3.9	4.7	12.7	11.4	10.3	26.6	9.6	14.4	15.5
稳定	磁铁矿	4.4	3.5	11.7	0.9	5.1	11	0.4	3.9	9.7	0.2	2.6	3.1
	独居石	/	/	0.1	0.1	/	0.2	0.4	0.1	0.2	0.3	/	0.1
	榍石	3.8	1.8	2.9	2.3	2.9	3.1	5.4	4.4	3.9	3	3.6	3.5
	重晶石	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	针铁矿	/	4.6	5.4	/	4.5	2.6	/	1.7	1	/	0.7	0.9
	红柱石	/	0.2	0.2	/	0	0.1	/	0.1	/	/	/	/
	锐钛矿	0.1	/	/	*	/	/	*	/	/	*	/	/
	金红石	0.2	1.4	1.9	0.3	2.4	2	0.4	2	2	0.1	1.1	1.7
	电气石	0.2	8.4	1	0.2	3	0.9	0.2	3.8	0.6	0	2.7	2.2
极稳定	白钛石	3.5	/	/	0.6	/	/	1.7	/	/	1.3	/	/
	锆石	1.8	0.6	1.9	1.4	1	2	2.1	1.4	2.4	1.4	1	1.3
	硬玉	/	1.6	0.1	/	0.1	/	/	0.1	/	/	0.1	0.2
	尖晶石	/	0.1	0.4	/	0.1	0.2	/	/	0.1	/	/	0.1
无法判断		5	–	–	8.3	–	–	6.3	–	–	7.8	–	–

注："–"代表含量＜0.01%；"*"代表1～5粒；"△"代表21～50粒；"/"代表未发现

测试结果存在一定差异，这是因为MLA650F计算矿物所占比重是通过矿物面积乘以矿物比重得到，而光学显微镜法是计算矿物颗粒数占总颗粒数的百分比。其中光学显微镜测得的角闪石含量明显比MLA650F含量高，可能是因为MLA650F较光学显微镜多测得的9种重矿物含量拉低了角闪石含量。从图3中可以明显看出3种实验方法在1号（图3a）、2号（图3b）、3号（图3c）和4号（图3d）样品中重矿物含量整体上变化趋势基本一致，均表明毛乌素沙地重矿物主要以普通角闪石-石榴子石为主。

4 讨论

矿物分析指标是重矿物组合分析和单个矿物分析或某几个矿物的比值，通过这些指标能更好的反应物源问题。4个样品均来自于毛乌素沙地，具有相似的动力条件，本文拟将矿物的成熟度（*Q/TF*）以及常用的重矿物特征指数*ATi*指数、*GZi*指数和*ZTR*指数进行对比[14-16]。成熟度（*Q/TF*）=石英/长石，*Q/TF*值越大，风化强度越强；*ATi*指数=磷灰石/（磷灰石+电气石）×100%，它属于物源敏感指标，但在沉积旋回的不同阶段，也会受到风化的影响[14]；*GZi*指数=石榴子石/（石榴子石+锆石）×100%，其指数揭示了石榴子石的母岩组成即角闪岩和麻粒岩的变化情况[14]；*ZTR*指数=（锆石+电气石+金红石）用来说明重矿物的成熟度，可以揭示沉积物的搬运距离和物质来源方向，一般其指数越大，则说明重矿物的成熟度指数越高，指示沉积物经历了长时间的搬运作用[15]。根据表4的计算结果可知，3种方法得到同一样品的矿物分析指标存在一定差异。MLA原样法的计算结果较MLA重矿法更接近光学显微镜法，这可能是因为二者前处理方法不同所致。由此可知，前处理方法或测试仪器的差异均会对矿物分析指标的结果产生影响。

不同区域矿物指标的相对大小和变化趋势可以反映沉积物距离物源区的搬运距离以及风化程度。本文根据采样区地理位置的差异，将西南地区1号、2号和东南地区3号、4号样品求平均值（表4），以便对不同方法在研究区实际工作中的变化趋势进行讨论。根据表4的计算结果统计，光学显微镜法和MLA原样法的*Q/TF*、*ATi*和*GZi*这3个矿物指标变化趋势基本一致，*ZTR*结果变化趋势不同。MLA重矿法的*GZi*值与另外2种方法所得结论相反，可能是由于前处理导致部分矿物丢失造成。从整体上来看，光学显微镜法与MLA原样法变化趋势基本

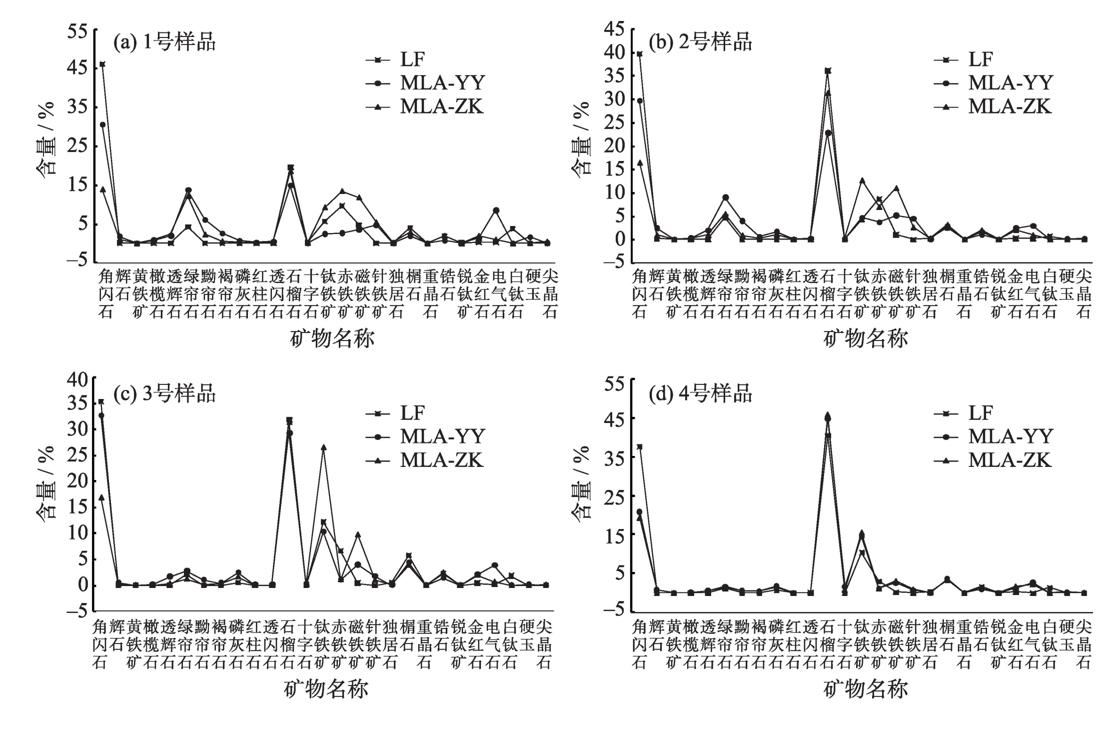


图3 毛乌素沙样光学显微镜与MLA650F矿物解离分析仪重矿物含量对比

Fig. 3 Comparison of heavy mineral in the Mu Us Sandy Land sand by MLA650F mineral liberation analyzer and optical microscope

表4　毛乌素沙地重矿物常用指标及*CIA*值结果

Tab. 4　Results of common mineral index and *CIA* value in the Mu Us Sandy Land

样品编号	实验方法	*Q*/*TF*	*ATi*指数	*GZi*指数	*ZTR*指数	*CIA*
	LF	3.42	23.81	91.12	2.18	
1	MLA-YY	2.06	7.43	95.97	10.43	51.06
	MLA-ZK	/	13.31	90.50	4.83	
	LF	3.84	5.00	95.89	1.86	
2	MLA-YY	1.39	35.43	95.75	6.37	49.28
	MLA-ZK	/	53.35	94.13	4.93	
	LF	3.63	14.40	93.50	2.02	
西南	MLA-YY	1.725	21.43	95.86	8.4	50.17
	MLA-ZK	/	33.33	92.31	4.88	
	LF	2.3	75.41	93.38	2.67	
3	MLA-YY	0.85	38.31	95.40	7.28	49.58
	MLA-ZK	/	72.31	92.83	5.04	
	LF	2.27	96.97	96.30	1.58	
4	MLA-YY	0.71	38.94	97.83	4.74	50.49
	MLA-ZK	/	38.21	97.23	5.15	
	LF	2.285	86.19	94.84	2.125	
东南	MLA-YY	0.78	38.63	96.62	6.01	50.03
	MLA-ZK	/	55.26	95.03	5.095	

注：“/”代表无计算结果；*Q*/*TF*，矿物的成熟度；*CIA*，化学蚀变指数

一致，MLA重矿法前处理过程对测试结果影响较大。

为了验证实验数据的准确性选取化学蚀变指数（*CIA*）作为参照。*CIA*的计算依据Al、K、Ca、Na等元素的摩尔数，常常被用于判断沉积物遭受的风化程度及其沉积时的气候环境，一般沉积物的风化强度与*CIA*值呈正比关系[17]。根据NESBITT[18]等的研究，*CIA*值在50～65之间，反应沉积物在寒冷、干燥的气候条件下经历了低等的化学风化[19]。从表4中可以看出，毛乌素沙地西南和东南地区的*CIA*值介于49.28～51.06之间，这表明毛乌素沙地西南和东南地区沉积物经历了较低等的化学风化。此外，毛乌素沙地西南地区的*CIA*值大于东南地区，这表明西南地区所遭受的化学风化程度较东南地区强，这与光学显微镜法和MLA原样法所测得的*Q*/*TF*，*ATi*结果高度一致。因此，以上2种方法的矿物分析指标变化趋势基本一致，在实际研究中均能很好的表示沉积物的沉积环境。但值得注意的是，不同方法下同一样品的同一指标数值存在一定差异，对一个区域的研究如果使用不同研究方法的实验数据，可能会导致结论错误。因此，在今后的研究中，引用矿物分析的实验数据时尽可能用同一实验室，同一标准下测得的数据结果。

5　结 论

本文运用光学显微镜法和QEMSCAN分析法（MLA原样法和MLA重矿法），分别对毛乌素沙地的沙样进行矿物分析，研究发现：MLA650F测量结果的重复性好，精确度高且测得的矿物种类较光学显微镜更丰富，能识别蚀变矿物。由于光学显微镜与MLA650F的测试原理和样品前处理过程不同，3种方法测得的单个矿物含量存在一定差异，但矿物变化趋势一致，均得到毛乌素沙地主要轻矿物以石英-长石为主，重矿物以角闪石-石榴子石为主的结论。3种方法对同一样品的矿物分析指标结果存在差异，但变化趋势基本一致。其中MLA原样与光学显微镜的*Q*/*TF*和*ATi*指标同化学风化指标*CIA*结果一致，均表明毛乌素沙地西南地区风化作用较东南地区强。光学显微镜与MLA650F各有其优缺点，研究者可以根据自己的需要进行选择，值得注意的是在实际工作中，要使用建立在同一测量系统内的数据，不同实验室或实验方法测得的实验数据在引用时要慎重。

参考文献(References)

[1] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415. [ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415.]

[2] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 46-54. [JIANG Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 46-54.]

[3] 高文华, 高抒, 王丹丹, 等. 废黄河沉积记录中来自不同河流物质的信息——基于重矿物与地球化学元素分析[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1631-1639. [GAO Wenhua, GAO Shu, WANG Dandan, et al. Sediment source information of different catchments in the sedimentary records of the abandoned Yellow River: Heavy mineral and geochemical analysis[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(12): 1631-1639.]

[4] 宋天锐. 重砂矿物分选及鉴定[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 16-123. [SONG Tianrui. Identification of heavy placer minerals[M]. Beijing: Geology Press, 1987: 16-123.]

[5] SEVERIN K P. Energy dispersive spectrometry of common rock forming minerals[M]. Netherland: Springer, 2007: 1-2.

[6] 董治宝. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 100-112. [DONG Zhibao. Sand and wind in the Kumtag Desert [M]. Beijing: Science Press, 2011: 100-112.]

[7] 马冀, 岳乐平, 杨利荣, 等. 毛乌素沙漠东南缘全新世剖面光释光年代及古气候意义[J]. 第四纪研究, 2011, 31(1): 120-129. [MA Ji, YUE Leping, YANG Lirong, et al. OSL dating of Holocene sequence and palaeoclimate change record in southeastern margin of Mu Us Desert, north China[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31 (1): 120-129.]

[8] 王陇, 高广磊, 张英, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1003-1010. [WANG Long, GAO Guanglei, ZHANG Ying, et al. Particle size distribution of aeolian soils in the Mu Us Sandy Land and the influence factors[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1003-1010.]

[9] 杨思全, 王薇. 毛乌素沙地土地沙漠化评价[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 258-262. [YANG Siquan, WANG Wei. Evaluation of desertification in Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 258-262.]

[10] LANCASTER N. The Namib sand sea: Dunes forms, processes and sediments[M]. Rotterdam: Balkema, 1989.

[11] 马收先, 孟庆任, 曲永强. 轻矿物物源分析研究进展[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 597-608. [MA Shouxian, MENG Qingren, QU Yongqiang. Development on provenance analysis of light minerals [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 597-608.]

[12] 王昆山, 石学法, 姜晓黎. 南黄海沉积物的来源及分区: 来自轻矿物的证据[J]. 科学通报, 2001(S1): 26-31. [WANG Kunshan, SHI Xuefa, JIANG Xiaoli. Sources and provinces of sediments in South Yellow Sea: Evidence from light minerals[J]. Chinese Science Bulletin, 2001(S1): 26-31.]

[13] 王秋良, 胡思辉, 李长安. 周老镇钻孔砾石层重矿物特征及地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 878-884. [WANG Qiuliang, HU Sihui, LI Chan'an. Heavy mineral characteristics of gravel layers in the Zhoulao Town borehole[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 878-884.]

[14] MORTON A C. HALLSWORTH C R. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(3-4): 241-256.

[15] HUBERT JF. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 1962, 32(3): 440-450.

[16] MORTON A C, HALLSWORTH C R, BAHLBURG H, et al. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1-4): 3-29.

[17] NESBITT H W, YOUNG G M. Early proterozoic climates and platemotions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(21): 715-717.

[18] NESBIT H W, YOUNG G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. The Journal of Geology, 1989, 97(2): 129-147.

[19] 秦作栋, 翟颖倩, 杨永刚, 等. 汾河源区不同景观带表土粒度与地球化学元素组成分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 62-69. [QIN Zuodong, ZHAI Yingqian, YANG Yonggang , et al. Topsoil particle size and geochemical elements in the different landscape zone in Fenhe River headwater catchment[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 62-69.]

Mineral quantitative analysis of Mu Us Sandy Land with QEMSCAN

CUI Ying-ying, ZHOU Ya-li, CHEN Guo-xiang, HUANG Chun-chang,
PANG Jiang-Li, YANG Jun-min, YAN Xue-jiao
(*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi' an* 710062, *Shaanxi, China*)

Abstract: The quantitative analysis of mineral experiments with Czech FEI company MLA650F mineral liberation analyzer, use the MLA original sample method and MLA heavy mineral method to analyze the mineral composition in the southwest and southeast of Mu Us Sandy Land in Shaanxi Province and Inner Mongolia Autonomous Region, China. Results show that MLA650F have good repeatability and high accuracy, and the mineral types measured are richer than those measured using the optical microscope. However, unlike the optical microscope, it cannot directly provide the original color, shape, transparency, luster, surface fracture, and other characteristics of the mineral. Although the individual mineral content and the mineral analysis index measured by QEMSCAN and optical microscope have some differences, the mineral change trend is basically the same. It is concluded that the main light minerals in Mu Us Sandy Land are quartz-feldspar and the heavy minerals are hornblende-garnet. In addition, QEMSCAN and optical microscope show similar change trend of mineral analysis indexes of the same sample. The original sample method of MLA is consistent with the *Q/TF* and *ATi* indexes of the optical microscope and with the *CIA* indexes of chemical weathering. Results showed that the weathering in the southwest of Mu Us Sandy Land was stronger than that in the southeast. Although both QEMSCAN and optical microscope can reflect the sedimentary environment, in practice, it should be noted that the data used should be established in the same measurement system, and the experimental data measured by different laboratories or experimental methods should be carefully quoted.

Key words: QEMSCAN; mineral analysis; Mu Us Sandy Land